

# 1993—2018年中国沿海海平面异常升高的 时空格局特征及潜在社会经济风险估计

孙艳伟<sup>1,2,3</sup>, 李莹<sup>4</sup>

(1. 宁波大学地理与空间信息技术系, 宁波 315211; 2. 宁波陆海国土空间利用与治理协同创新中心, 宁波 315211; 3. 浙江省新型重点专业智库宁波大学东海战略研究院东海海洋生态研究中心, 宁波 315211;  
4. 黑龙江科技大学矿业工程学院, 哈尔滨 150022)

**摘要:** 全球变暖诱发海平面上升是当前陆海作用领域的热点议题。应用卫星高度计观测海平面异常(SLA)数据, 结合共享社会经济路径情景(SSPs), 探讨我国沿海地区1993—2018年海平面异常升高的时空格局特征及潜在社会经济风险。结果显示:(1)过去26年间, 我国沿海年均海平面和极端海平面均呈波动上升趋势, 变化速率分别达到 $3.47 \pm 0.50$  mm/a和 $4.74 \pm 1.39$  mm/a。(2)空间上, 我国四大海区上升速率由高到低排序为: 东海>黄海>渤海>南海; 省域尺度上, 苏、闽、浙的海平面增速较大, 而粤、沪、台的海平面上升速率较慢。(3)MK检验和Sen趋势分析显示, 整个海区的年均海平面全部呈显著增加趋势, 其中84.16%的区域处于增速中等偏慢水平, 2.32%的区域增速快; 而极端海平面中显著增加区域占76%, 其中59.65%的区域增速慢, 2.31%的区域增速快; 无显著减少区域。(4)空间波动性上, 我国历年海平面变化整体处于较低的波动水平; 其中, 较低波动区占61.31%, 而高波动与较高波动区仅占到3.17%。(5)到2100年, 我国海平面上升高度将达到 $71.71 \pm 19.01$  cm; 在三种共享社会经济发展路径下(SSP<sub>1</sub>、SSP<sub>2</sub>和SSP<sub>3</sub>), 我国沿海地区潜在经济损失将达10万~21万亿元人民币(2005年可比价), 受影响人口数达350万~550万人; 其中, 广东省水淹面积最大(占到省份陆域总面积的0.7%), 经济和人口风险也最高。因此, 减缓和应对海平面上升风险, 是21世纪我国沿海地区保持经济社会、资源环境可持续发展的重要命题。

**关键词:** 海平面变化; 时空分布; SSPs; 社会经济风险

全球变暖诱发海平面上升被认为是21世纪人类面临的最主要风险和最重要的挑战之一<sup>[1]</sup>。海平面上升可以导致海岸侵蚀<sup>[2]</sup>、沿海风暴潮灾害增加<sup>[3]</sup>、加剧咸潮上溯<sup>[4]</sup>和生境退化<sup>[5]</sup>等生态环境问题, 进而对沿海地区居民生活和社会发展构成巨大潜在风险。近年来, 随着全球气候变暖现象的加剧, 海平面上升的相关研究成为陆海作用领域的热点议题。预计到2100年, 全球平均海平面上升25~123 cm, 每年将有0.2%~4.6%的人口被淹没, GDP损失0.3%~9.3%<sup>[6]</sup>; 西太平洋低洼沿海地区49个地中海文化区中的37个处于100年一遇洪水的威胁中, 42个处于海岸侵蚀威胁中<sup>[2]</sup>; 随着海平面上升, 像芬兰湾这类洪水易发地在大风气候中将受到巨大程度的不利影响<sup>[7]</sup>; 在日本, Nagai等<sup>[1]</sup>建议政府加大投资以改善横滨和川崎市海岸防御, 避免海平面升高后淹没地区面积增加。

收稿日期: 2020-07-27; 修订日期: 2021-02-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41976209)

作者简介: 孙艳伟(1983-), 男, 内蒙古赤峰人, 博士, 讲师, 主要从事资源环境经济与管理研究。

E-mail: sunyanwei@nbu.edu.cn

通讯作者: 李莹(1982-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 讲师, 主要从事土地利用与水文水资源研究。

E-mail: 2020800236@usth.edu.cn

近几十年来,我国海平面上升增速高于全球平均水平<sup>[8]</sup>;而我国近海区域海岸线长达1.8万km,拥有丰富的生境和生物多样性<sup>[9]</sup>,海岸带人口稠密、经济发展迅速,海平面上升将对沿海地区造成巨大潜在风险。因而,探讨我国东部沿海海平面异常升高及其带来的影响对于区域可持续发展具有重要意义,相关研究也得到了广泛关注。目前已有研究关注不同尺度不同区域海平面上升的变化特征,包括国家尺度<sup>[10,11]</sup>、海域尺度<sup>[12,13]</sup>、省域或城市群尺度<sup>[14-16]</sup>和市域尺度<sup>[17]</sup>;部分学者关注海平面上升带来的影响,如黄浦江极端风暴洪水的危险性<sup>[18]</sup>,山东沿渤海湾地区风暴潮淹没范围<sup>[19]</sup>,环渤海海岸的敏感性<sup>[13]</sup>,红树林湿地的脆弱性<sup>[20]</sup>,预测耕地损失<sup>[21]</sup>,人口、经济暴露度研究<sup>[22]</sup>等;此外,还有部分学者关注如何应对海平面上升的风险<sup>[23,24]</sup>。然而,已有研究中使用数据密度、数据基准面及数据长度未形成统一标准,而且针对海平面上升造成的社会经济风险亦缺乏定量评估。因此,需要进一步探讨我国沿海地区海平面变化的时空格局特征,并估计未来可能造成的潜在风险。

鉴于此,本文以我国整个东部沿海为研究区域,基于高分辨率卫星高度计观测海平面异常数据(SLA),利用Theil-Sen Median变化趋势分析和Mann-Kendall检验分析1993—2018年我国海岸线50 km以内海域的海平面异常升高的时空格局特征。同时,按照历史时期海平面变化趋势估计2100年海平面上升增量,分析在三种共享社会经济路径下,各沿海省域单元人口和经济面临的潜在风险,以期为沿海地区可持续性管理的开展提供数据支撑和理论依据。

## 1 研究方法与数据来源

### 1.1 研究区概况

中国东部沿海地区位于0~45°N、100~140°E,包括天津、辽宁、河北、山东、江苏、上海、浙江、福建、广东、广西、海南、香港、澳门和台湾等14个地区,拥有三大城市群:京津冀城市群、珠三角城市群、长三角城市群,是我国城镇化水平和城镇化速度最高、经济发达、人口密集的地区。东部沿海地区面积(不包括港澳台地区)占我国国土面积的4.37%,而人口占全国总人口的18.65%,贡献GDP总量约35.5%。本文以我国东部海岸线50 km缓冲区以内海域作为研究区,涵盖了我国的渤海、黄海、东海和南海以及邻近海域。参考中央气象台对中国海区的划分标准,将我国海域划分为四大海区,并按照沿海省份的矢量边界,把海域归入各省份。我国沿海多数地区普遍海拔较低(约1~4 m),最低处不足1 m<sup>[22]</sup>,因此对海平面变化高度敏感,海平面异常升高对此区域人口和经济发展具有潜在威胁。

### 1.2 数据来源

海平面异常(Sea-Level Anomaly, SLA)数据:来自法国航天局(AVISO),本文选用分辨率为0.25°×0.25°网格的日栅格数据。首先,运用Matlab软件提取1993—2018年我国东部沿海地区海平面变化日值数据,进而采用均值法(即把年内各像元SLA日值数据的均值作为该年份的SLA年均值)获取SLA年均值代表海平面变化的平均状况;同时,采用最大值合成法(即年内各像元SLA日值数据的最大值作为该年份的SLA最大值)获取SLA年内最大值来代表极端海平面变化状况。

高精度海岸线数据GSHHG(A Global Self-consistent, Hierarchial, High-resolution Geography Database):来源于美国国家海洋与大气管理局,数据库中包含5种分辨率的海岸

线数据。本文选取高分辨率海岸线数据, 空间分辨率为200 m, WGS-84坐标系, ESRI shapefiles格式。依据前人研究经验, 应用ArcGIS 10.2软件沿海岸线向海域方向生成50 km的缓冲区作为研究区域<sup>[25]</sup>。数据下载地址为: <http://www.soest.hawaii.edu/wessel/gshhg/>。

DEM (Digital Elevation Model) 数据: 空间分辨率为1 km, 数据来源于资源环境数据云平台 (<http://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=123>), 用于提取未来海平面上升导致的陆地淹没范围。

人口和GDP网格 (Global dataset of gridded population and GDP scenarios) 数据: 数据来自日本国家环境研究所全球环境研究中心, 该数据集将1980—2100年全球人口和GDP进行网格化, 划分为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的网格, 每10年统计一次。以2005年为基准, 1980—2010年的数据是按各国家实际人口和国内生产总值比例估算得到, 2020—2100年的数据是依据IPCC公布的三种未来共享社会经济路径, 即可持续发展路径 (SSP<sub>1</sub>)、中度发展路径 (SSP<sub>2</sub>)、局部或不一致路径 (SSP<sub>3</sub>) 预测人口和国内生产总值<sup>[26]</sup>。数据下载地址为: <https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=about>。

### 1.3 研究方法

本文选用Man-Kendall趋势检验方法和Theil-Sen Median趋势分析方法来分析海平面变化趋势的显著性和变化程度; 应用ArcGIS 10.2软件空间分析模块结合标准差方法, 研究1993—2018年研究区海平面变化的波动性; 根据预估2100年海平面变化状况, 结合DEM数据、人口和GDP栅格数据, 提取海水淹没空间范围, 并运用面积权重法估算海岸带人口和经济损失值。

#### 1.3.1 Theil-Sen Median趋势分析和Man-Kendall趋势检验

Theil-Sen Median趋势分析法用于分析估算时间序列数据的变化趋势度<sup>[27]</sup>, 公式如下:

$$S_{SLA} = \text{Median} \frac{SLA_j - SLA_i}{j - i} \quad 1993 \leq i < j \leq 2018 \quad (1)$$

当 $S_{SLA} < 0$ 时, 表示 $SLA$ 呈下降趋势, 当 $S_{SLA} > 0$ 时, 表示 $SLA$ 呈上升趋势。

Man-Kendall检验方法用来判断趋势的显著性, 此方法无需样本服从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰<sup>[27]</sup>, 计算公式如下:

设定  $\{SLA_i\}$ ,  $i=1993, 1994, \dots, 2018$ , 定义 $Z_s$ 统计量为:

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & (S > 0) \\ 0, & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & (S < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(SLA_j - SLA_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(SLA_j - SLA_i) = \begin{cases} -1, & SLA_j - SLA_i < 0 \\ 0, & SLA_j - SLA_i = 0 \\ 1, & SLA_j - SLA_i > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

式中:  $SLA_i$ 和 $SLA_j$ 分别表示 $i$ 年和 $j$ 年像元的 $SLA$ 值;  $n$ 表示时间序列的长度;  $\text{sgn}$ 是符号函数;  $Z$ 为标准化后的检验统计量, 当 $|Z| > u_{1-\alpha/2}$ 时, 表示明显趋势变化。本文中置信度水

平 $\alpha=0.05$ , 判断在0.05置信水平上 $SLA$ 时间序列变化趋势的显著性。

### 1.3.2 标准差

标准差 ( $Stdev$ ) 可以反映一个数据集的离散程度, 是数据变量偏离常态距离的平均数, 其值越大, 说明数据距离平均值越远, 变化越大<sup>[28]</sup>。

$$Stdev = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (SLA_i - \overline{SLA})^2} \quad (6)$$

本文将标准差划分为五类: 低 ( $0.026 < Stdev \leq 0.032$ )、较低 ( $0.032 < Stdev \leq 0.038$ )、中 ( $0.038 < Stdev \leq 0.044$ )、较高 ( $0.044 < Stdev \leq 0.050$ ) 和高 ( $0.050 < Stdev \leq 0.056$ )。

### 1.3.3 海平面异常升高的时空格局特征分析

为揭示我国东部沿海地区1993—2018年海平面变化的时空趋势特征, 本文整合Theil-Sen趋势分析和Mann-Kendall检验方法, 使用Matlab软件计算得到研究区各像元的变化趋势值和显著性, 然后应用ArcGIS 10.2软件将分析所得结果进行图层叠加, 并依据海平面变化的显著性和变化趋势将 $SLA$ 划分为四种类别, 分别为: (1) 当 $S_{SLA} < 0$ ,  $|Z| > 1.96$ 时,  $SLA$ 显著减少; (2) 当 $S_{SLA} < 0$ ,  $|Z| \leq 1.96$ 时,  $SLA$ 轻微减少; (3) 当 $S_{SLA} > 0$ ,  $|Z| \leq 1.96$ 时,  $SLA$ 轻微增加; (4) 当 $S_{SLA} > 0$ ,  $|Z| > 1.96$ 时,  $SLA$ 显著增加<sup>[27]</sup>。

### 1.3.4 海平面上升导致的淹没范围和人口、经济潜在风险分析

基于DEM数据和预估的2100年海平面变化结果, 应用ArcGIS 10.2软件空间分析工具提取2100年海平面上升导致的可能淹没区域范围, 然后应用GIS分区统计工具计算研究区各省(市、自治区)的淹没面积; 进而采用面积权重法, 结合2100年全球人口和GDP格网数据, 估算三种共享社会经济发展路径下(SSP<sub>1</sub>、SSP<sub>2</sub>和SSP<sub>3</sub>)各省(市、自治区)淹没区域的人口和经济损失值, 对比分析海平面上升的人口、经济潜在风险差异。

## 2 结果分析

### 2.1 我国东部沿海海平面变化的时空分布特征

#### 2.1.1 年均海平面变化的时空分布特征

1993—2018年, 我国东部沿海年均海平面变化呈现波动上升的趋势(图1、图2); 其中2016年海平面上升最明显, 结果与海平面公报一致<sup>[29]</sup>。图1给出我国四大海区年均海平面变化的总体态势。2014—2016年间, 渤海、黄海和东海海平面上升明显。其中2014年, 渤海和黄海海域海平面较常年分别升高110.66 mm和96.71 mm; 2016年, 渤海、东海和黄海海域海平面较常年分别升高111.47 mm、106.10 mm和100.69 mm。南海海域在2012年和2017年海平面升高最明显, 较常年分别高出86.70 mm和103.41 mm; 在强拉尼娜事件期间, 该区域海平面显著上升<sup>[12]</sup>。

1993—2018年, 我国沿海海平面年均增速为 $3.47 \pm 0.50$  mm/a, 与其他学者研究结果接近<sup>[10]</sup>, 超过全球同时段海平面平均水平 ( $3.15 \pm 0.3$  mm/a)<sup>[29]</sup>。其中, 东海海域海平面变化的年均增速最大, 为 $3.75 \pm 0.55$  mm/a; 其次是黄海和渤海, 分别为 $3.75 \pm 0.47$  mm/a和 $3.56 \pm 0.35$  mm/a; 南海海域海平面变化年均增速最小, 为 $3.29 \pm 0.24$  mm/a。省域尺度上看, 江苏和福建海平面年均增速最大(图2), 分别为 $4.20 \pm 0.62$  mm/a和 $4.09 \pm 0.55$  mm/a; 其次是浙江、山东、京津冀、广西和辽宁地区, 分别为 $3.71 \pm 0.35$  mm/a、 $3.68 \pm 0.32$  mm/a、 $3.65 \pm 0.17$  mm/a、 $3.65 \pm 0.10$  mm/a和 $3.55 \pm 0.31$  mm/a; 台湾、上海、广东和海南省海平面增速相对较小, 其中台湾最小, 为 $3.01 \pm 0.39$  mm/a。



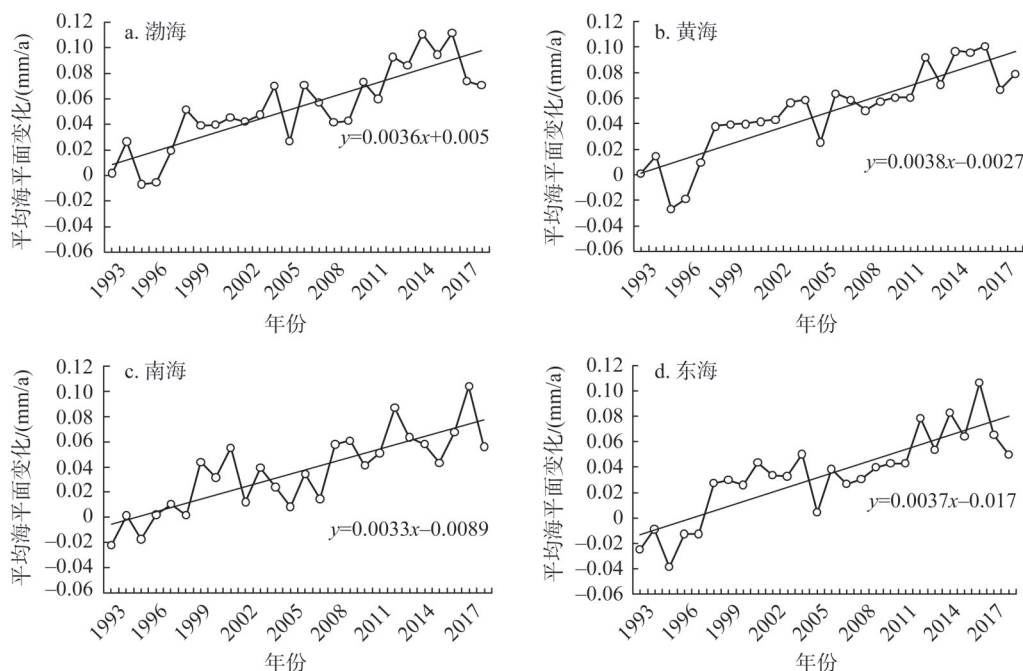


图1 1993—2018年中国东部沿海四大海区年均海平面变化

Fig. 1 Annual sea level change of four sea areas of China during 1993-2018

从空间分布来看, 各海区海平面年均变化均呈显著增加趋势 ( $S_{SLA} > 0$ ,  $|Z| > 1.96$ ), 不同之处在于变化的速率与幅度有所不同, 表现出明显的地域分异特征 (图3)。1993—2018年间, 沿海大部分地区海平面年增速在2.82~4.12 mm/a之间, 属于中等偏慢水平, 分布于如图所示的橙色和黄色区域, 占总面积的84.16%, 包括广西、海南和京津冀的沿海地区, 辽宁、山东和浙江的大部分沿海区域、江苏南部、上海中东部等地区。增加速度最快的区域 (深蓝色区域) 面积较小, 仅占2.15%, 分布于福建南部地区 (漳州、泉州和厦门市) 与江苏北部 (盐城市部分沿海地区), 增速在4.77~5.42 mm/a之间; 其次, 辽宁东部丹东市、山东东营和青岛、江苏北部连云港南部和盐城地区、浙江舟山和宁波以及福建北部宁德和福州的部分地区海平面增速也较快 (淡蓝色区域), 增速介于4.12~4.77 mm/a之间; 上海的西部、广东湛江以及台湾西南部、东部和北部部分地区海平面增速最小 (红色区域), 增速低于2.82 mm/a。

### 2.1.2 极端海平面变化的时空分布特征

如图4和图5所示, 1993—2018年我国东部沿海极端海平面也呈现出波动上升的趋势; 各海区极端海平面与整个研究区年均变化规律一致。黄海、东海和渤海在1995年极端海平面上升最少, 较常年分别增加201.29 mm、217.62 mm和226.77 mm, 而南海1997年极端海平面上升最少, 较常年高出269.32 mm; 南海和东海海域在2017年极端海平面上升最高, 较常年分别高出450.40 mm和457.83 mm; 渤海和黄海海域在2018年极端海平面上升最高, 较常年分别高出449.80 mm和368.09 mm。

从增加速率来看, 1993—2018年沿海极端海平面年均增速为 $4.54 \pm 1.39$  mm/a。其中东海极端海平面年均增速最大, 为 $5.84 \pm 1.19$  mm/a; 其次是渤海, 为 $4.48 \pm 1.84$  mm/a; 南海极端海平面年均增速最小, 为 $3.84 \pm 1.16$  mm/a。省域尺度上来看, 福建和浙江极端海

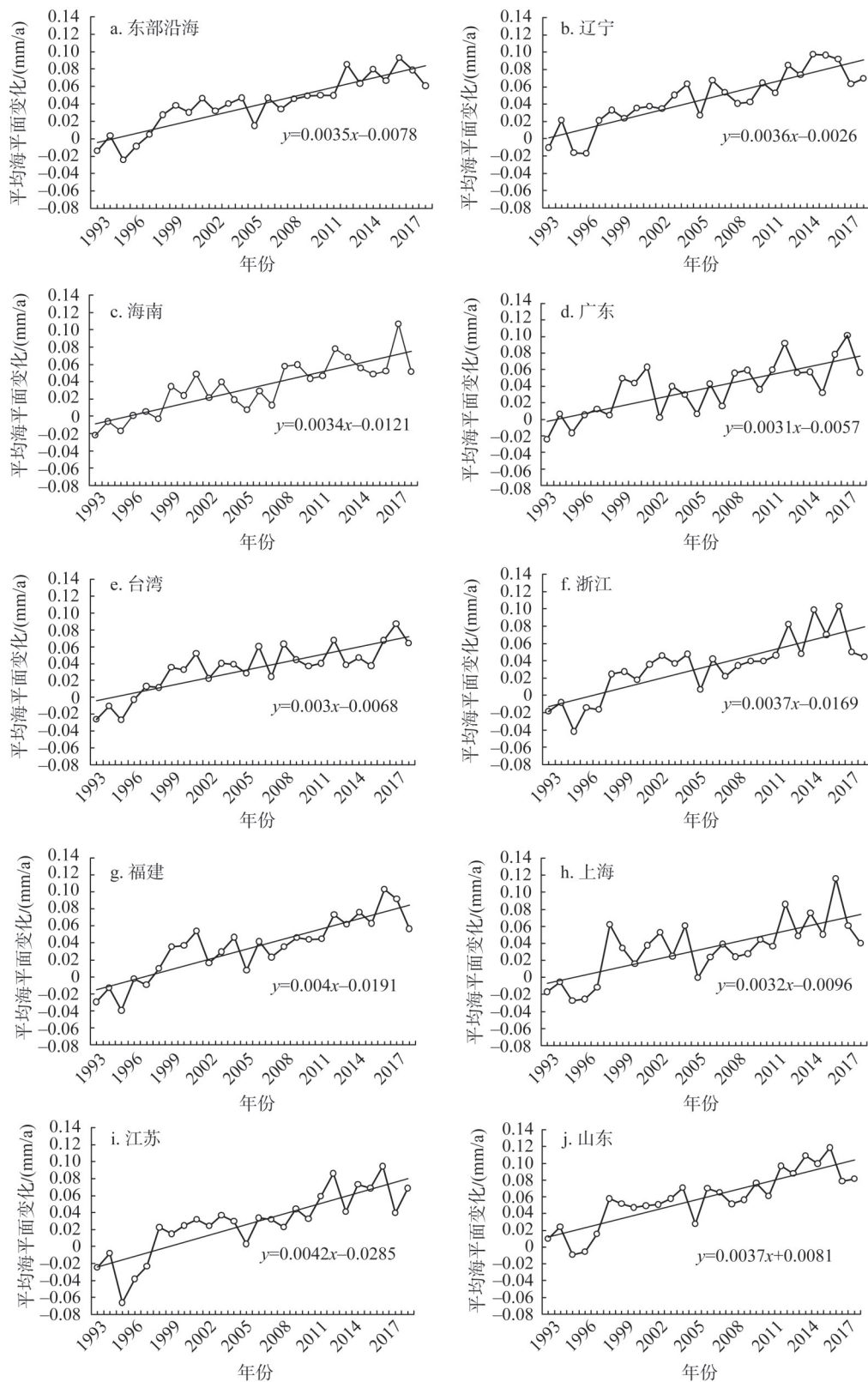


图2

续图2

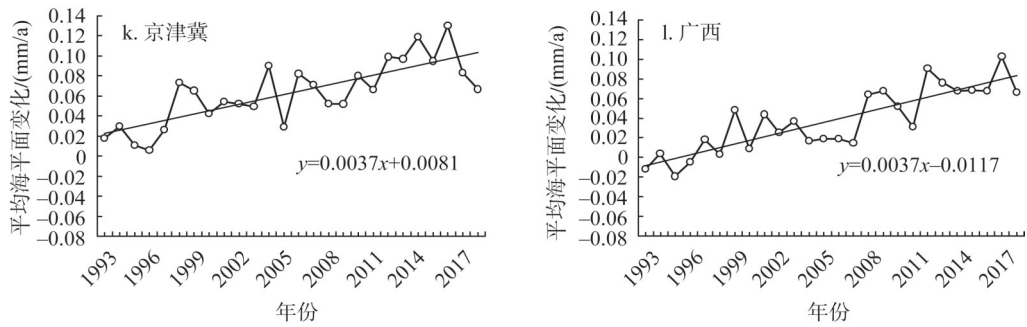
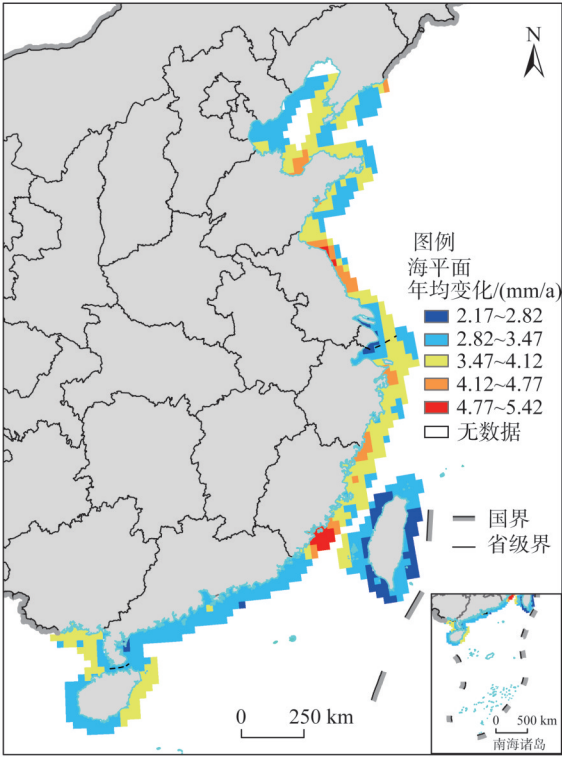


图2 1993—2018年中国沿海各地区年均海平面变化  
Fig. 2 Annual sea level change of each sea area of China during 1993-2018

平面年均增速较大（图5），都大于6 mm/a；其次是京津冀地区和江苏，增速约5.50 mm/a左右；上海极端海平面年均增速最小。

由表1和图6a可知，我国东部沿海极端海平面总体呈现增加的趋势，增加区域的面积远超过减少区域的面积。其中，增加区域约占整个沿海区域的99%，显著增加区域所占的比例约76.07%，不显著增加区域占比约23.04%；而研究区内无显著减少的区域，不显著减少的区域也不足1%。图6b显示，极端海平面显著增加的区域主要集中在辽宁、京津冀、山东、浙江、福建、海南和台湾大部分地区以及广东中部、广西西南部海区；不显著增加的区域主要分布于辽宁东部、京津冀中部小部分区域、江苏西部和东北部以及中北部地区、上海南部、广东东部与福建西南部接壤地区、广东西部与广西东部接壤的地区、海南的西南部和台湾西部区域；不显著减少地区仅位于上海北部地区。

极端海平面显著性变化趋势如图6b所示，深蓝色区域增速最快，速率大于10 mm/a，面积仅占0.29%，分散分布于江苏中部盐城市和福建南部的厦门与漳州市；淡蓝色区域增速较快，速率在8.5~10.7 mm/a之间，面积占比为2.02%，分散分布于京津冀北部（天津和黄骅市）、江苏



审图号: GS(2020)4619号 自然资源部 监制

注：本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作，底图无修改，下同。

图3 1993—2018年中国沿海海平面年均变化空间分布特征

Fig. 3 Spatial distribution of annual sea level change in coastal areas of China from 1993 to 2018

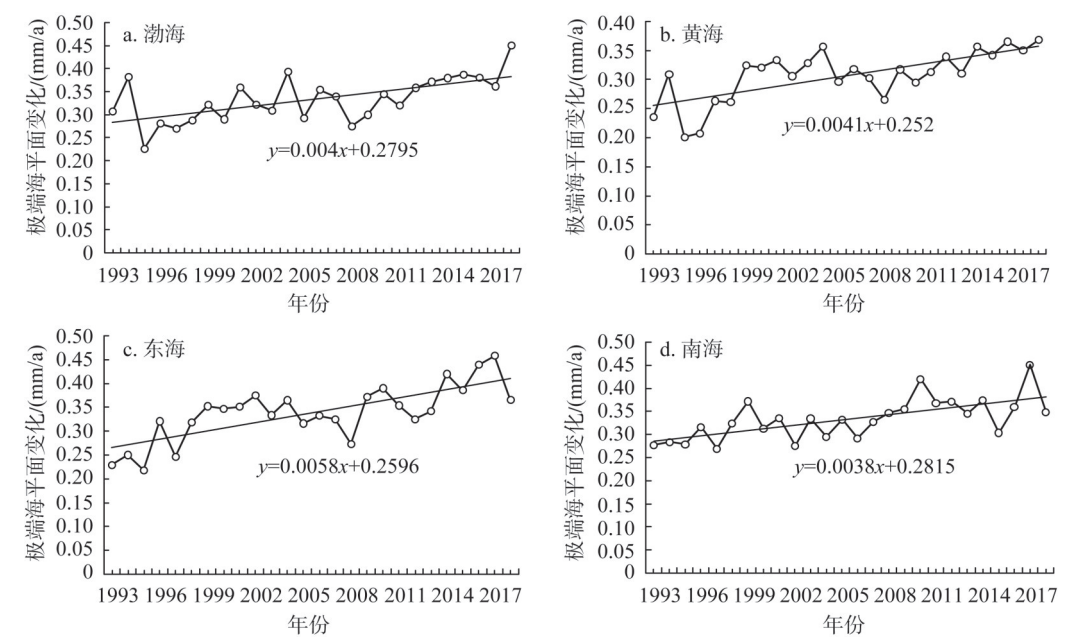


图4 1993—2018年中国东部沿海四大海区极端海平面变化

Fig. 4 Annual extreme sea level change in four sea areas of China from 1993 to 2018

北部盐城市、上海与浙江的交界处、福建中部的莆田和泉州市；增速最慢地区（橘色区域）面积占比最大，约为42.90%，连片分布于辽宁大部分区域、京津冀东部地区、山东北部和中部地区以及台湾省，零散分布于江苏北部、浙江和上海交界处、广东、广西西部与海南南部。在不显著增加区域中，82.15%的地区处于中等增速水平；增速较快和最

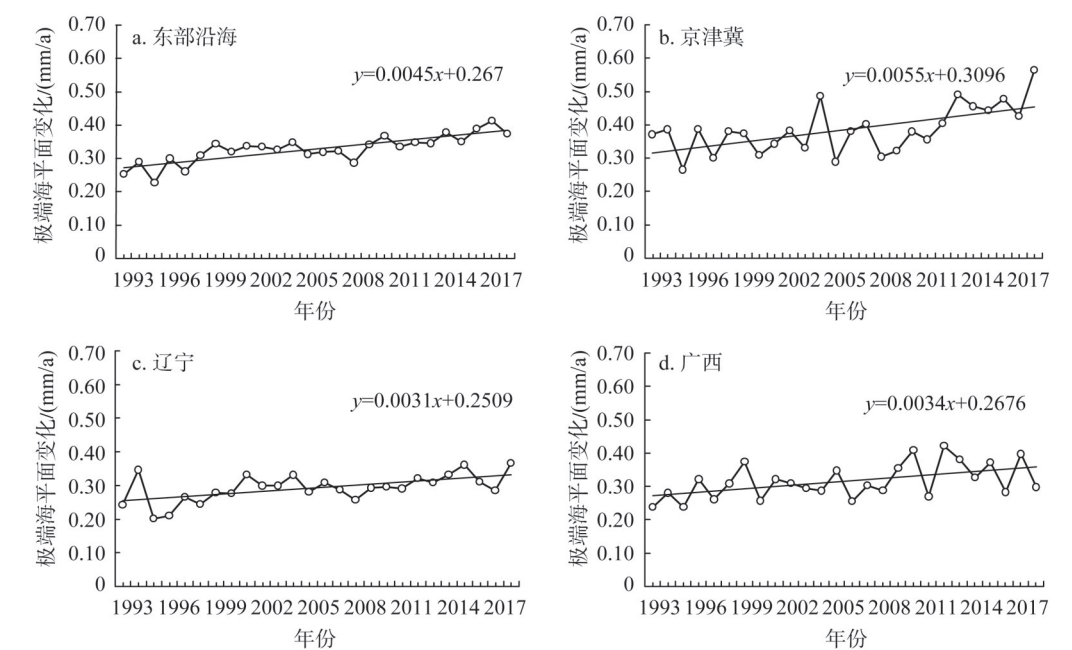


图5



续图5

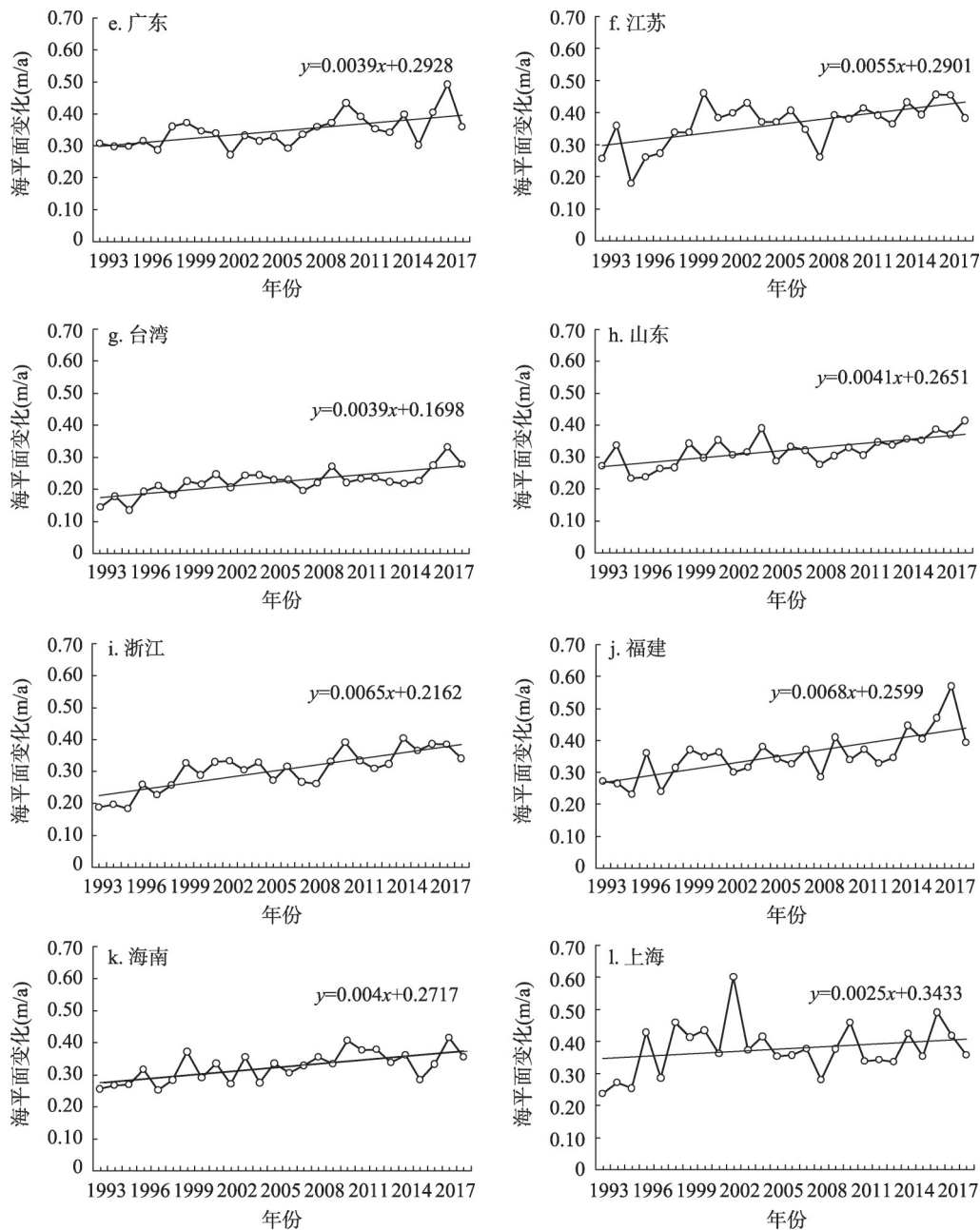


图5 1993—2018年中国东部沿海各地区极端海平面变化

Fig. 5 Annual extreme sea level change in each coastal provincial-level region of China from 1993 to 2018

快的区域面积最小，占总区域的0.22%，零星分布于江苏中部、上海与浙江交界处和福建北部；增速较慢区域占总面积的16.75%，分散在辽宁与京津冀交界处、江苏北部、上海北部、广东、广西与广东交界处、海南西南部以及台湾省小部分区域。

2.2 我国东部沿海海平面变化的波动性分析

1993—2018年我国沿海海平面变化的波动特征如图7所示，海平面变化的标准差介

表1 研究区海平面变化趋势

Table 1 The trend of sea level change in China's sea areas

变化趋势 $S_{SLA}$	Z值	趋势类型	面积/km <sup>2</sup>	面积百分比/%
$S_{SLA} < 0$	$ Z  > 1.96$	显著减少	0	0
$S_{SLA} < 0$	$ Z  \leq 1.96$	不显著减少	5000	0.88
$S_{SLA} > 0$	$ Z  \leq 1.96$	不显著增加	130625	23.04
$S_{SLA} > 0$	$ Z  > 1.96$	显著增加	431250	76.08

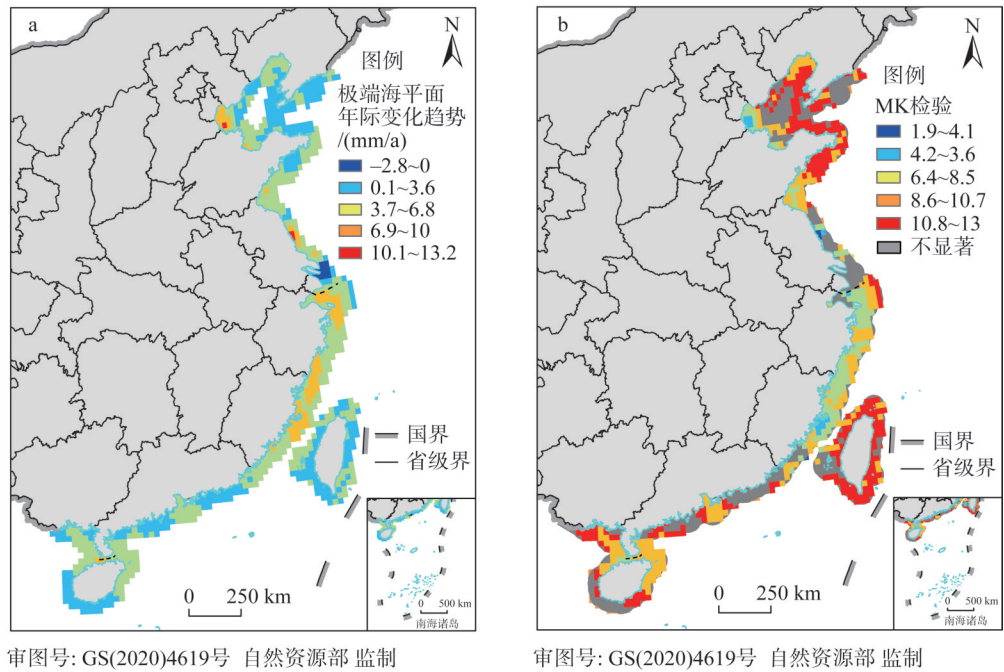


图6 1993—2018年中国沿海极端海平面年均变化空间分布特征及MK显著性检验

Fig. 6 Spatial distribution of annual extreme sea level change and its Mann-Kendall test in coastal areas of China from 1993 to 2018

于0.026~0.056 mm之间，整体呈现“较低波动为主，高波动与较高波动少”的分布特征。空间格局表现为：高波动与较高波动区（红色和橙色区域）很少，所占比例约3.17%，主要分布于江苏省，极小部分位于福建省；中波动区（黄色区域）占比约10.86%，呈斑块状分布，分布于辽宁东部边缘、山东西部边缘、江苏北部、上海、浙江北部以及和福建的交界处、福建南部和台湾南部边缘地区；较低波动区（绿色区域）分布最广，占比约为61.31%，其与低波动区（蓝色区域）连片分布在一起，所占比例较大，合计约85.97%，集中分布于辽宁、京津冀、山东、浙江、福建、广西、广东、海南和台湾，这些海域海平面变化相对稳定。珠江三角洲沿岸东北方向和西南方向的海平面波动性较低<sup>[14]</sup>。

2.3 未来我国东部沿海海平面上升的经济和人口潜在风险

2.3.1 2100年沿海海平面变化预估和淹没区域分析

据过去近30年海平面变化趋势，估算2100年我国东部沿海地区极端海平面预计整体

上升高度为  $71.71 \pm 19.01$  cm, 这与 IPCC RCP 8.5 (完全不采取措施不减排) 情景下预测全球海平面 (57~131 cm) 相近<sup>[30]</sup>。海域尺度上, 到 2100 年东海海平面上升最高, 较常年升高  $84.31 \pm 21.71$  cm; 其次为渤海, 较常年升高  $77.77 \pm 25.93$  cm; 第三为黄海, 较常年升高  $70.37 \pm 16.47$  cm; 南海海平面增加最小, 较常年升高  $66.34 \pm 16.01$  cm。省域尺度, 京津冀地区、福建省和浙江省附近海域海平面高度上升相对较高, 较常年分别升高  $101.36 \pm 32.97$  cm、 $95.08 \pm 12.42$  cm 和  $86.89 \pm 13.79$  cm; 而上海、广西和台湾的海平面上升相对较低, 较常年升高小于 60 cm。

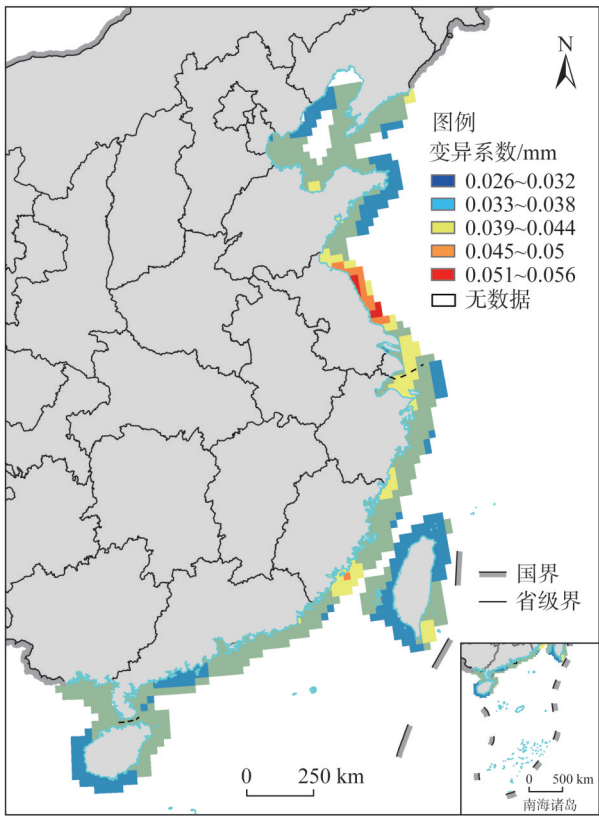
如表 2 所示, 至 2100 年, 我国沿海省份中水淹面积最大的省份为广东省, 将达到  $1288.25 \text{ km}^2$ , 约为广东省陆域面积的 0.7%。由于省内的珠江口是一个喇叭口型、与河网区并存的复式河口, 海水容易向河内网区扩散, 加之沿海地势低洼, 因而容易发生大面积的淹没。康蕾等<sup>[21]</sup>也发现, 珠江三角洲地区是中国海岸带中风暴潮灾害最集中的区域之一; 其次为江苏省、浙江省和福建省, 水淹面积也相对较大, 分别为  $918.93 \text{ km}^2$ 、 $832.55 \text{ km}^2$  和  $718.44 \text{ km}^2$ ; 水淹面积相对较小的是山东、台湾、海南、辽宁和广西, 介于  $260 \sim 435 \text{ km}^2$ ; 京津冀地区和上海市淹没范围最小, 低于  $200 \text{ km}^2$ 。

2.3.2 不同社会经济发展路径下我国沿海区域人口和经济潜在风险分析

预计到 2100 年, 我国东部沿海区域在 SSP<sub>1</sub> 发展路径下的经济损失总量最大 (约 20.46 万亿元) (表 2); SSP<sub>2</sub> 发展路径下经济损失约 20.22 万亿元; SSP<sub>3</sub> 发展路径下损失最小, 仅相当于 SSP<sub>1</sub> 路径的 55.43% (约 11.34 万亿元)。对比各沿海地区估计结果发现, 广东、浙江、福建和江苏损失较严重, 其中广东损失最严重, 高超等<sup>[22]</sup>也发现广州市是经济受影响最严重的城市, 广东在三种路径下经济损失分别为 6.29 万亿元、6.24 万亿元和 3.59 万亿元, 占全国总损失量的 30.74%、30.86% 和 31.66%; 其次为浙江, 损失占比分别为 13.56%、14.05% 和 14.16%; 江苏沿海地区经济损失也很大<sup>[31]</sup>。海平面变化影响较小的区域为海南、京津冀地区和广西, 以海南影响最小。

### 2.3.2 不同社会经济发展路径下我国沿海区域人口和经济潜在风险分析

海平面升高对各省份人口的影响也存在差异。与经济损失相反, 在 SSP<sub>3</sub> 发展路径下, 受影响人口总量最大, 约 548 万人; SSP<sub>1</sub> 发展路径影响人口最小, 约 351 万人。各省份相比较, 人口损失较大的省份和上述经济损失较大的省份相同, 广东省人口损失量最大, 三种发展路径下分别为 106 万人、132 万人和 167 万人; 其次为浙江省, 分别达到 53 万人、



审图号: GS(2020)4619号 自然资源部 监制

图 7 1993—2018 年中国沿海海平面变化的标准变异  
Fig. 7 Standard deviation of annual sea level change in coastal areas of China from 1993 to 2018

表2 到2100年我国沿海地区海平面上升导致的经济和人口损失分析

Table 2 Analysis of economic and population loss caused by sea level rise in coastal areas of China at the end of 2100

地区	水淹面积/km <sup>2</sup>	SSP <sub>1</sub>		SSP <sub>2</sub>		SSP <sub>3</sub>	
		GDP/万亿元	人口/万人	GDP/万亿元	人口/万人	GDP/万亿元	人口/万人
福建	718.44	2.38	49	2.47	61	1.38	73
广东	1288.25	6.29	106	6.24	132	3.59	167
广西	260.64	0.24	5	0.25	7	0.13	8
海南	425.25	0.20	5	0.20	5	0.12	6
江苏	918.93	2.47	42	2.36	54	1.18	67
京津冀	172.73	0.20	5	0.23	7	0.14	8
辽宁	327.21	0.50	11	0.53	14	0.32	17
山东	434.08	1.54	21	1.43	26	0.77	32
上海	140.84	2.12	19	1.79	23	0.89	33
台湾	432.42	1.74	35	1.88	44	1.21	56
浙江	832.55	2.77	53	2.84	67	1.61	81
总计	5951.34	20.45	351	20.22	440	11.34	548

67万人、81万人。人口损失较小省份与上述经济损失较小省份相同，分别为海南、京津冀地区和广西，在SSP<sub>1</sub>发展路径下这三个区域损失量接近，约5万人；在SSP<sub>2</sub>发展路径下海南省损失5万人，京津冀地区和广西的损失人口接近，各7万人；在SSP<sub>3</sub>发展路径下，海南省人口损失仍然最小，为6万人，广西和京津冀地区各损失约8万人。

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1) 近26年来，我国沿海海平面总体呈现波动上升态势。依据我国沿海分布50余个海平面观测点的实测数据，自1980年以来我国沿海海平面上升速率为3.4 mm/a<sup>[8]</sup>。以上结果与本文中基于卫星高度计(SLA)观测结果基本一致，可见卫星数据具有较好的观测精度。然而，相较于离散的观测站点数据，卫星高度计数据具有获取成本低、时空连续性好等优势，可以用于表征大尺度海域海平面的变化趋势。此外，海岸工程设施(如海堤)的建设可以在一定程度上减缓、抵御海平面上升带来的风险。然而，由于大尺度海堤分布数据的缺失，在预估21世纪末我国沿海地区海平面上升导致的社会经济损失时，本文并未考虑海岸工程设施、海岸地形条件的变化等因素<sup>[31,32]</sup>。事实上，我国天津沿海以及长江以南地区地面以沉降为主<sup>[8]</sup>。因此，在未来的工作中需要综合考虑海岸工程以及地形变化等因素，对海平面变化风险进一步开展深入细致的研究。

(2) 共享社会经济路径(SSP<sub>s</sub>)是2010年由IPCC组织提出，将排放情景与社会经济发展情景相结合，用以阐述社会经济发展的演变趋势<sup>[3]</sup>。本文发现，不同共享社会经济发展路径下海平面上升带来的风险损失显著不同：在SSP<sub>1</sub>路径发展下，经济损失总量最大，其次为SSP<sub>2</sub>路径，SSP<sub>3</sub>路径下损失最小；而在SSP<sub>3</sub>发展路径下，人口影响总量最大，SSP<sub>1</sub>路径下人口影响最小。根本原因在于三种路径社会经济发展的演变趋势<sup>[26]</sup>存在差异：SSP<sub>1</sub>路径为可持续发展路径，对资源强度需求较低，高度重视环境问题，技术进步，经济发展较快，生育率较低；SSP<sub>2</sub>是中间路径，社会经济发展与历史时期趋势相



似;而 $SSP_3$ 是局部或不一致的发展,发展极其不均衡,大部分地区实行封闭的自给自足发展政策,相对高的出生率使得该路径下的人口增长迅速,而人均经济和科技发展水平均低于其他路径,经济增速较为缓慢。由此可见,未来几十年内,海岸带地区面临的海平面上升风险主要取决于人口和产业的再分布态势,合理的人口和产业布局是应对未来海平面上升风险的有效途径之一。

### 3.2 结论

(1) 1993—2018年间,我国东部沿海年均海平面和极端海平面的变化均呈现波动上升趋势,各海域海平面变化速率由大到小的排序为:东海、渤海、黄海和南海。各地区海区年均海平面和极端海平面变化速率有所差异,年均海平面变化速率从大到小依次为:江苏>福建>浙江>山东>京津冀>广西>辽宁>海南>广东>上海>台湾;极端海平面变化速率从大到小依次为:福建>浙江>江苏>京津冀>山东>海南>广东>台湾>广西>辽宁>上海。

(2) 从空间变化趋势来看,年均海平面变化在整个研究区都呈现显著增加趋势,多数区域海平面增加速率属于中等偏慢水平,连片分布于辽宁、浙江、广西、海南和京津冀等地区;极少区域增速很快,主要位于台湾省,零星分布在上海和广东。而极端海平面变化存在显著增加、不显著增加和不显著减少三种趋势,以增加趋势为主,增加区域占研究区的99%。其中,显著增加区域占76%,主要连片分布于研究区域的中部,分散分布于研究区的南北;增速较快的区域极少,分散位于江苏、上海、浙江、京津冀北部和福建中部;增速稍慢区域占比最大,达59.65%,连片分布于辽宁、京津冀东部地区、山东北部和中部地区以及台湾省,零散分布于江苏北部、浙江与上海交界处、广东、广西西部和海南南部;不显著增加区域占20%,呈分散分布;不显著减少区域不足1%,仅分布在上海北部。

(3) 1993—2018年间,海平面波动性呈现“较低波动为主,高波动与较高波动极少”的空间分布特征:高波动与较高波动区占比不足5%,主要分布于江苏省,少数在福建省,此区域海平面变化较大;较低波动区分布最广,与低波动区一起呈连片分布,两者合计达86%,集中分布于辽宁、京津冀和山东等地区,此区域海平面变化相对稳定;中波动区占比约10%,呈斑块状,分布于辽宁东部、山东西部、江苏北部和上海等,这些区域海平面变化处于中间状态。

(4) 到2100年,我国东部沿海区域在 $SSP_1$ 发展路径下经济损失最大,人口总量影响最小;在 $SSP_2$ 发展路径下经济损失和人口损失均列第二位;在 $SSP_3$ 发展路径下经济损失最小,约为 $SSP_1$ 发展路径的一半,但人口损失最大。各省份(直辖市、自治区)中,广东省经济和人口损失都是最为严重;浙江、福建和江苏省经济与人口损失次之;海南省经济和人口损失均最小,其次是京津冀地区和广西壮族自治区也都相对较小,其他省份的损失程度处于中等水平。

关于未来海平面变化的趋势和驱动机理研究仍存在诸多不确定性,加强陆海交互系统的多要素协同观测以及先进预测方法的研发是今后工作的重点。全球范围内,海岸带是人口、经济聚集分布的核心地域,如何适应和减缓海平面上升带来的负面影响,是摆在决策者与管理者面前极具挑战性的难题。因此,在“陆海统筹”<sup>[33,34]</sup>、“韧性海岸带生态修复”<sup>[35]</sup>等先进理念的引导下,统筹陆海国土空间开发、建立海洋灾害的分类分区长效预警体系是有效应对未来气候变化诱发灾害的重要抓手。

## 参考文献(References):

- [1] NAGAI R, TAKABATAKE T, ESTEBAN M, et al. Tsunami risk hazard in Tokyo Bay: The challenge of future sea level rise. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 45: 101321, Doi: 10.1016/j.ijdrr.2019.101321.
- [2] REIMANN L, VAFEIDIS AT, BROWN S, et al. Mediterranean UNESCO world heritage at risk from coastal flooding and erosion due to sea-level rise. *Nature Communications*, 2018, 9: 4161, Doi: 10.1038/s41467-018-06645-9.
- [3] VAN VUUREN D, RIAHI K, MOSS R, et al. A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 21-35.
- [4] 孔兰, 陈晓宏, 杜建, 等. 基于数学模型的海平面上升对咸潮上溯的影响. *自然资源学报*, 2010, 25 (7): 1097-1104. [KONG L, CHEN X H, DU J, et al. Impact of sea level rise on salt water intrusion based on mathematical model. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(7): 1097-1104.]
- [5] STUBBS Q, YEO I Y, LANG M, et al. Assessment of wetland change on the Delmarva Peninsula from 1984 to 2010. *Journal of Coastal Research*, 2020, 36(3): 575-589.
- [6] HINKEL J, LINCKE D, ATHANASIOS T, et al. Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, 111(9): 3292-3297.
- [7] HIERONYMUS M, DIETERICH C, ANDERSSON H, et al. The effects of mean sea level rise and strengthened winds on extreme sea levels in the Baltic Sea. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2018, 8(6): 366-371.
- [8] 国家海洋局. 2019年中国海平面公报. [http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430\\_2510978.html](http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510978.html), 2019-12-01/2020-04-12. [Ministry of Natural Resources. China Sea Level Bulletin 2019. [http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430\\_2510978.html](http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510978.html), 2019-12-01/2020-04-12.]
- [9] 蔡榕硕, 谭红建, 郭海峡. 中国沿海地区对全球变化的响应及风险研究. *应用海洋学学报*, 2019, (4): 514-527. [CAI R S, TAN H J, GUO H X. Responses and compound risks of the coastal China areas to global change. *Journal of Applied Oceanography*, 2019, (4): 514-527.]
- [10] QU Y, JEVREJEVA S, JACKSON L P, et al. Coastal sea level rise around the China Seas. *Global and Planetary Change*, 2018, 172: 454-463.
- [11] 王龙. 基于19年卫星测高数据的中国海海面变化及其影响因素研究. 青岛: 中国海洋大学, 2013. [WANG L. Study of sea level change and its influencing factor in the China Sea based on nineteen years' altimeter data. Qingdao: Ocean university of China, 2013.]
- [12] 丘福文, 方文东, 朱大勇, 等. 2005—2010年南海海面异常升高的特征与机制. *热带海洋学报*, 2015, 34(5): 11-18. [QIU F W, FANG W D, ZHU D Y, et al. Characteristics and mechanism of the sea level rise in the South China Sea during 2005-2010. *Journal of Tropical Oceanography*, 2015, 34(5): 11-18.]
- [13] 王远东, 侯西勇, 施平, 等. 海平面上升背景下环渤海海岸敏感性研究. *地理科学*, 2013, 33(12): 1514-1523. [WANG Y D, HOU X Y, SHI P, et al. Sensitivity analysis along the Bohai Coast under the background of sea level rise. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(12): 1514-1523.]
- [14] 任美镔. 黄河长江珠江三角洲近30年海平面上升趋势及2030年上升量预测. *地理学报*, 1993, 48(5): 385-393. [REN M E. Relative sea level rise in Huanghe, Changjiang and Zhujiang (Yellow, Yangtze and Pearl River) Delta over the last 30 years and predication for the next 40 years (2030). *Acta Geographica Sinica*, 1993, 48(5): 385-393.]
- [15] 何蕾, 李国胜, 李阔, 等. 1959年来珠江三角洲地区的海平面变化与趋势. *地理研究*, 2014, 33(5): 988-1000. [HE L, LI G S, LI K, et al. Changes and trends of sea level in the Pearl River Delta in the last 50 years. *Geographical Research*, 2014, 33(5): 988-1000.]
- [16] 陈特固, 黄博津, 汤超莲, 等. 广东省海平面变化的过去和未来. *广东气象*, 2013, 35(2): 10-15. [CHEN T G, HUANG B J, TANG C L, et al. The past and future of sea level variations in Guangdong province. *Guangdong Meteorology*, 2013, 35(2): 10-15.]
- [17] 程和琴, 王冬梅, 陈吉余. 2030年上海地区相对海平面变化趋势的研究和预测. *气候变化研究进展*, 2015, 11(4): 231-238. [CHENG H Q, WANG D M, CHEN J Y. Study and prediction of the relative sea level rise in 2030 in Shanghai area. *Climate Change Research*, 2015, 11(4): 231-238.]
- [18] 殷杰, 尹占娥, 于大鹏, 等. 海平面上升背景下黄浦江极端风暴洪水危险性分析. *地理研究*, 2013, 32(12): 2215-2221. [YIN J, YIN Z E, YU D P, et al. Hazard analysis of extreme storm flooding in the context of sea level rise: A case study of Huangpu River Basin. *Geographical Research*, 2013, 32(12): 2215-2221.]

- [19] 龙飞鸿, 石学法, 罗新正. 海平面上升对山东沿渤海湾地区百年一遇风暴潮淹没范围的影响预测. 海洋环境科学, 2015, 34(2): 211-216. [LONG F H, SHI X F, LUO X Z. The impact prediction of sea level rise on the inundated area caused by 100-yearrecurrence-period storm surge of Shandong province around Bohai Bay. Marine Environmental Science, 2015, 34(2): 211-216.]
- [20] 李莎莎. 海平面上升影响下广西海岸带红树林生态系统脆弱性评估. 上海: 华东师范大学, 2015. [LI S S. Vulnerability assessment of the coastal mangrove ecosystems in Guangxi, China to sea-level rise. Shanghai: Doctoral Dissertation of East China Normal University, 2015.]
- [21] 康蕾, 马丽, 刘毅. 珠江三角洲地区未来海平面上升及风暴潮增水的耕地损失预测. 地理学报, 2015, 70(9): 1375-1389. [KANG L, MA L, LIU Y. Loss evaluation of farmland caused by sea level rise and storm surge in the Pearl River Delta region under global climate change. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1375-1389.]
- [22] 高超, 汪丽, 陈财, 等. 海平面上升风险中国大陆沿海地区人口与经济暴露度. 地理学报, 2019, 74(8): 1590-1604. [GAO C, WANG L, CHEN C, et al. Population and economic risk exposure in coastal region of China under sea level rise. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(8): 1590-1604.]
- [23] 李响, 刘克修, 董军兴, 等. 中国沿海海平面上升风险区划方法研究. 海洋预报, 2014, 31(2): 41-49. [LI X, LIU K X, DONG J X, et al. Research on the risk zoning method of sea level rise in China. Marine Forecasts, 2014, 31(2): 41-49.]
- [24] 温家洪, 袁穗萍, 李大力, 等. 海平面上升及其风险管理. 地球科学进展, 2018, 33(4): 350-360. [WEN J H, YUAN S P, LI D L, et al. Sea level rise and its risk management. Advances in Earth Science, 2018, 33(4): 350-360.]
- [25] LI G, LI X, YAO T, et al. Heterogeneous sea-level rises along coastal zones and small islands. Science Bulletin, 2019, 64(11): 748-755.
- [26] 姜彤, 赵晶, 景丞, 等. IPCC共享社会经济路径下中国和分省人口变化预估. 气候变化研究进展, 2017, 13(2): 128-137. [JIANG T, ZHAO J, JING C, et al. National and provincial population projected to 2100 under the shared socioeconomic pathways in China. Climate Change Research, 2017, 13(2): 128-137.]
- [27] 田义超, 黄远林, 张强, 等. 北部湾南流江流域植被净初级生产力时空分布及其驱动因素. 生态学报, 2019, 39(21): 8156-8171. [TIAN Y C, HUANG Y L, ZHANG Q, et al. Spatiotemporal distribution of net primary productivity and its driving factors in the Nanliu River Basin in the Beibu Gulf. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): 8156-8171.]
- [28] 徐建华. 现代地理学中的数学方法(2版). 北京: 高等教育出版社, 2002: 27-35. [XU J H. Mathematical Methods in Modern Geography (2nd Edition). Beijing: Higher Education Press, 2002: 27-35.]
- [29] 国家海洋局. 2018年中国海平面公报. [http://gi.mnr.gov.cn/201905/t20190510\\_2411195.html](http://gi.mnr.gov.cn/201905/t20190510_2411195.html), 2019-12-01/2020-04-12. [Ministry of Natural Resources. China Sea Level Bulletin 2018. [http://gi.mnr.gov.cn/201905/t20190510\\_2411195.html](http://gi.mnr.gov.cn/201905/t20190510_2411195.html), 2019-12-01/2020-04-12.]
- [30] MATTHIAS M, ANDERS L, KATJA F, et al. Future sea level rise constrained by observations and long-term commitment. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2016, 113(10): 2597-2602.
- [31] 李加林, 王艳红, 张忍顺, 等. 海平面上升的灾害效应研究: 以江苏沿海低地为例. 地理科学, 2006, 26(1): 87-93. [LI J L, WANG Y H, ZHANG R S, et al. Disaster effects of sea level rise: A case of Jiangsu coastal lowland. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(1): 87-93.]
- [32] 李加林, 田鹏, 邵姝遥, 等. 中国东海区大陆岸线变迁及其开发利用强度分析. 自然资源学报, 2019, 34(9): 1886-1901. [LI J L, TIAN P, SHAO S Y, et al. The change of continental coastline and its development and utilization intensity. Journal of Natural Resources, 2019, 34(9): 1886-1901.]
- [33] 纪学朋, 黄贤金, 陈逸, 等. 基于陆海统筹视角的国土空间开发建设适宜性评价: 以辽宁省为例. 自然资源学报, 2019, 34(3): 451-463. [JI X P, HUANG X J, CHEN Y, et al. Comprehensive suitability evaluation of spatial development and construction land in the perspective of land-ocean co-ordination: A case study of Liaoning province, China. Journal of Natural Resources, 2019, 34(3): 451-463.]
- [34] 韩增林, 夏康, 郭建科, 等. 基于Global-Malmquist-Luenberger指数的沿海地带陆海统筹发展水平测度及区域差异分析. 自然资源学报, 2017, 32(8): 1271-1285. [HAN Z L, XIA K, GUO J K, et al. Research of the level and spatial differences of land-sea coordinate development in coastal areas based on Global-Malmquist-Luenberger Index. Journal of Natural Resources, 2017, 32(8): 1271-1285.]
- [35] 李杨帆, 向枝远, 杨奕, 等. 基于韧性理念的海岸带生态修复规划方法及应用. 自然资源学报, 2020, 35(1): 130-140. [LI Y F, XIANG Z Y, YANG Y, et al. Application of ecological restoration and planning based on resilience thinking in coastal areas. Journal of Natural Resources, 2020, 35(1): 130-140.]

## Assessment of spatio-temporal distribution characteristic of sea level anomaly changes and its potential socio-economic risks in China's coastal areas from 1993 to 2018

SUN Yan-wei<sup>1,2,3</sup>, LI Ying<sup>4</sup>

(1. Department of Geography and Spatial Information Techniques, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. Ningbo Universities Collaborative Innovation Center for Land and Marine Spatial Utilization and Governance Research at Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 3. Donghai Academy, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 4. School of Mining Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China)

**Abstract:** Global warming induced sea level rise is a hot topic in the field of land-sea interaction. Coastal erosion and flooding caused by sea level rise pose a great threat to the environment and economic development. We examined the spatial-temporal distribution characteristics and potential social and economic risks of sea level change in China's coastal areas from 1993 to 2018 based on the sea-level anomaly (SLA) data and the shared social and economic path scenario (SSP<sub>s</sub>). The results showed that: (1) During the study period, the average annual sea level and extreme sea level in the study area showed a significant rising trend, with the rate of change reaching up to  $3.47 \pm 0.50$  mm/a and  $4.74 \pm 1.39$  mm/a, respectively. (2) The rising rate of the four major sea areas of China is listed as follows: East China Sea > Yellow Sea > Bohai Sea > South China Sea. In terms of the provincial scale, Jiangsu, Fujian and Zhejiang have higher sea level growth rates, while Guangdong, Shanghai and Taiwan have lower sea level rise rates. (3) The results of MK test and Sen trend analysis showed that the average annual sea level had a significant increase trend in the whole study area. Specifically, 84.16% of the area had a moderately slow growth rate and 2.32% of the area was going fast. As for the extreme sea level, areas with a significant increase accounted for 76%, of which 59.65% had a slow growth and 2.31% had a fast growth. During the study period, there was no significant reduction in the area. (4) In terms of spatial volatility, the sea level change over the past decades had been at a relatively low volatility level. According to statistical results, the lower volatility area accounts for 61.31%, while the highest and higher volatility areas only account for 3.17%. (5) By 2100, under three shared social and economic development paths (SSP<sub>1</sub>, SSP<sub>2</sub> and SSP<sub>3</sub>), the potential economic losses in Chinese coastal areas will reach 10-21 trillion yuan, and the population affected by sea level rise is about 3.5-5.5 million. From the provincial perspective, Guangdong has the largest flooded area (accounting for 0.7% of the total land area of the province), and the highest economic and population risks. Therefore, mitigation and adaption to the risk of sea level rise is an important task for maintaining sustainable socio-economic development, resources utilization and environmental protection in China's coastal areas in the 21st century.

**Keywords:** sea level change; spatial and temporal distribution; SSP<sub>s</sub>; socio-economic risk